

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25281014

研究課題名(和文) 3次元森林構造に蛍光分布情報を付加した新しい光環境 光合成モジュールの開発

研究課題名(英文) Development of a new model of a light environment and canopy photosynthesis based on detailed three dimensional canopy structure and sun-induced chlorophyll fluorescence

研究代表者

小林 秀樹 (KOBAYASHI, Hideki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球表層物質循環研究分野・主任研究員

研究者番号：10392961

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではLiDAR観測などに基づく詳細な野外観測による、3次元の森林情報を収集した。そしてこれらの詳細な森林情報を入力データとして利用することが可能な太陽光励起クロロフィル蛍光・光環境モデルを開発した。本研究の結果、新しい蛍光放射伝達モデルが開発され、モデルの感度解析や全球シミュレーションを実施することに成功した。そして、この解析から本開発モデルの適用可能性やその限界が明らかとなった。クロロフィル蛍光の観測値は光合成活性指標として注目されている衛星観測物理量の一つである。今後、開発したモデルを用いて衛星によるクロロフィル蛍光観測の物理的解釈が進められると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a new three dimensional sun-induced chlorophyll fluorescence emission model. The three dimensional forest structure information was collected by the terrestrial LiDAR measurements of the trees in the field site. The collected data were used as input data of the developed model. With this newly developed model, the simulated global patterns of sun-induced chlorophyll fluorescence were evaluated. This study also quantified the applicability and limit of the developed model. Satellite measurement of the global sun-induced chlorophyll fluorescence is one of the upcoming and encouraging variables to make better understanding in the global terrestrial photosynthesis estimation. The new model will contribute to the improved understanding of the relationship between satellite-based sun-induced chlorophyll fluorescence measurements and leaf- and canopy-scale photosynthesis.

研究分野：陸域リモートセンシング

キーワード：リモートセンシング 陸域生態系モデル 植物生理生態 炭素循環 三次元計測

1. 研究開始当初の背景

近年、全球炭素・水フラックス観測網の増加や、衛星データと陸域生態系モデルの解析によって全球炭素・水収支の理解が進んだ。多くの陸域生態系モデルでは、葉群が単一層にランダム分布している状態での光環境を計算し、その代表値を一枚の葉（ビククリーフ）か日向・日陰の二枚の葉で代表させて光合成や熱・水収支計算を行なっている。これらのモデルの高度化研究は、現状モデルに新たな生理・物理プロセスを追加するという改定プロセスを積み上げる方法が一般的である。

しかしながら、このタイプのモデル（以下1次元モデル）では林分構造情報を葉面積指数（≒葉の枚数）だけで代表させる場合が多く、観測で得られる森林構造情報と1次元モデル内で表現されている生態パラメータは必ずしも一対一対応ではない。

一方で、近年の地上・航空機 LiDAR 技術の進歩により森林構造を3次元格子情報に変換できるようになりつつある。また、野外用超光波長野外分光器の登場により森林の群落レベルのクロロフィル蛍光の観測が可能になってきた。

2. 研究の目的

本研究ではこの様な背景（モデルの不確実性、観測技術の向上）を踏まえ、詳細な野外観測に基づき光環境-群落光合成過程を解明し、3次元の光環境-クロロフィル蛍光過程をモデル化する。さらに全球シミュレーションによってその地理分布を明らかにするとともに、全球光合成量推定値（Gross Primary Production, GPP）との比較を行った。具体的な実施項目は以下のとおりである。

- (1) 3次元林分構造の取得とクロロフィル蛍光・光合成及び生物季節情報の観測
- (2) 3次元森林構造格子情報を活用した光環境-クロロフィル蛍光モジュールの開発と検証
- (3) 3次元モデル比較による全球シミュレーションの試行と全球 GPP データとの比較

3. 研究の方法

- (1) 3次元林分構造の取得と生物季節・植物生理活性の観測

クロロフィル蛍光放射のモデル開発に必要な3次元林分構造とクロロフィル蛍光、光合成の観測を実施した。単木レベルの研究では、ソメイヨシノの樹木を対象とした。樹木の3次元点群データを取得するために、2013年7月と2014年1月に3次元レーザースキャナー観測

を実施し、樹木とその周辺環境の3次元点群データを得た（図1）。

得られた点群データからソメイヨシノの樹木の情報を抽出し、10cm単位のボクセル情報への変換した。また、簡易光合成測定器(EARS社製 MiniPPM 300)と超高波長分解能分光放射計(Ocean Optics社製 HR4000)を用いて、葉のクロロフィル蛍光データを取得した。これらの観測の補助データとしてシュートレベルの形質、フェノロジー観測、単葉の色素分析、比葉面積、インターバルカメラによるフェノロジー観測を実施した。

また、アラスカのポーカーフラットサイトおよびアラスカ・ハイウェイ沿いの数地点においてデジタルカメラによるフェノロジー撮影を行った。ポーカーフラットサイトでは簡易光合成測定器(EARS社製 MiniPPM 300)と超高波長分解能分光放射計(Ocean Optics社製 HR4000)を用いてクロロフィル蛍光と分光計測を行った。

- (2) 3次元森林構造格子情報を活用した光環境-蛍光-群落光合成モジュールの開発と検証

クロロフィル蛍光放射を計算するための放射伝達モデルを構築した。このモデルは本課題実施者が以前から開発を進めている放射伝達コード FLiES (Kobayashi and Iwabuchi, 2008) をベースとして開発した。従来の FLiES コードは、樹木を回転楕円体や円柱、三角錐などの単純な幾何形状で近似するモデルであったが、本課題で LiDAR 観測から構築された樹木の3次元格子データを入力可能なモデルに拡張した。さらに、葉の表と裏から強度の異なる蛍光放射が射出される条件での蛍光計算モジュールを追加した。

開発したモデルに対して(1)の観測で得られたソメイヨシノの葉面蛍光データや

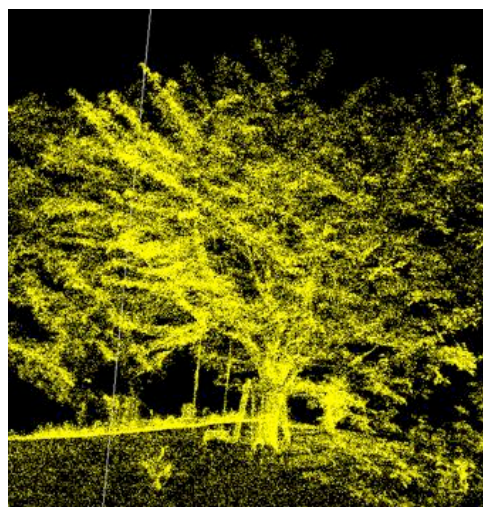


図1. 2013年7月のLiDAR観測で得られたソメイヨシノの点群データの一例

LiDAR データを適用して三次元の蛍光シミュレーションを実施した。さらに、クロロフィル蛍光の群落構造や葉面積及び観測条件による影響を調査するために、様々な条件で感度分析を実施した。

(3) 全球シミュレーションの試行と全球 GPP データとの比較

本研究で開発したクロロフィル蛍光放射モデルを用いてクロロフィル蛍光を全球陸域 1 度グリッドで推定し、衛星によるクロロフィル蛍光の推定値及び全球 GPP マップとの比較を行った。

全球シミュレーションを実施する際に必要となる蛍光放射モデルの入力データ（葉面積指数や光合成有効放射を計算するためのエアロゾル光学的厚さ）は、MODIS の 1 度グリッドのデータプロダクトを入手して利用した。また、衛星観測クロロフィル蛍光値としては、MetOp-A/GOME-2 のクロロフィル蛍光プ

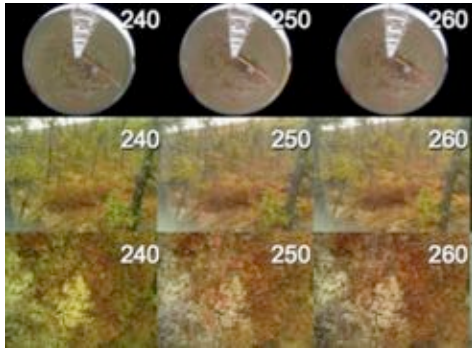


図 2. アラスカのリゾロジーカメラから得られた林床植生の季節変化の例 (2015 年)、写真右上の数字は 1 月 1 日からの積算日

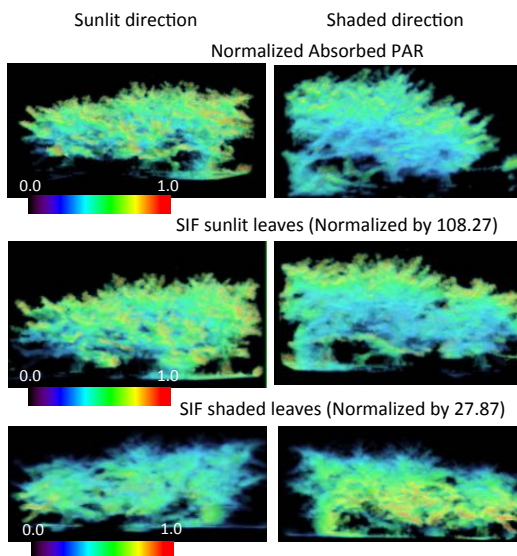


図 3. 開発した蛍光放射モデルによるソメイヨシノの吸収 PAR (上段)、陽葉の正規化蛍光放射強度 (中段)、陰葉の正規化蛍光放射強度の計算結果

ロダクト (Joiner et al., 2014) を利用した。全球の GPP データとしては、機械学習による地上-衛星データからの GPP 推定値 (サポートベクター回帰, SVR) を利用した (Kondo et al., 2015)。本シミュレーション解析は、2009 年の植生生長期 (5-9 月) で実施した。

4. 研究成果

(1) 生物季節・植物生理活性調査

2013 年-2015 年において単木調査サイトではソメイヨシノの生物季節観測やクロロフィル蛍光の観測、アラスカサイトでは、林床植生の光合成活性 (PAM)、クロロフィル蛍

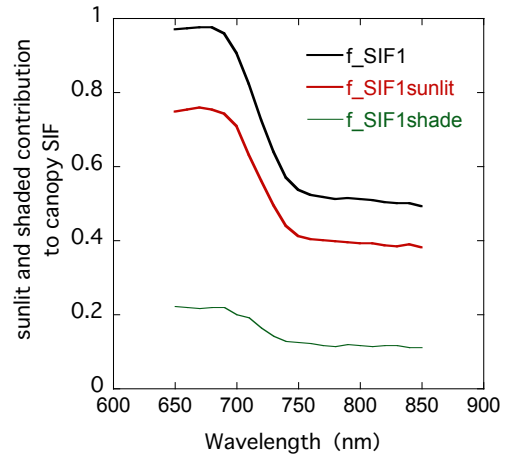
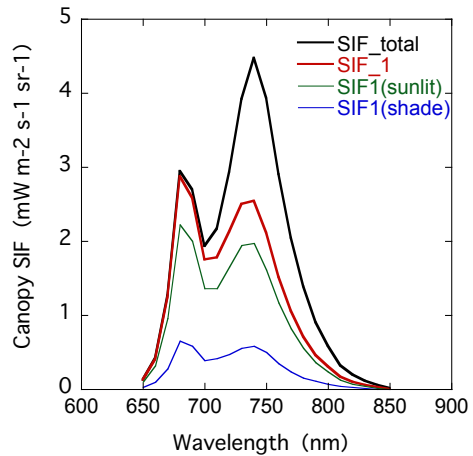


図 4. LAI=4.26, 太陽天頂角: 32.77°, 観測角: 1.5° におけるシミュレーション結果

上段: クロロフィル蛍光放射モデルで計算した、蛍光放射輝度の波長依存性

SIF_{total}: 植生の樹冠レベルのトータルの蛍光輝度

SIF₁: 葉群から蛍光射出し、散乱されることなく観測方向に射出された成分

SIF₁(sunlit): SIF₁のうち、陽葉から射出された成分。

SIF₁(shade): SIF₁のうち、陰葉から射出された成分

下段: 樹冠レベルのクロロフィル蛍光に対する陽葉と陰葉の波長別寄与比

光輝度、及び生物季節観測を行った。図2に一例として、クロトウヒ林の林床植生の季節変化の様子を示す。この観測結果は、開発を行った蛍光放射モデルの入力データとして利用された。また、アラスカサイトでは、林床植生の蛍光寄与(≒光合成活性)がクロトウヒの樹冠の蛍光量に対して無視できない事が明らかとなった。

(2) 単木レベルでのシミュレーション結果

ソメイヨシノの単木レベルでのLiDAR観測と葉の蛍光などの観測で得られたデータをもとに三次元のクロロフィル蛍光シミュレーションを実施した(図3に結果例)。開発したモデルを用いることで太陽放射方向(Sunlit direction)とその反対側(Shaded direction)における光合成有効放射の吸収量の違いに伴う蛍光強度の三次元空間分布の様子が見て取れる。

例えば、陽葉は太陽光の入射方向側に多く存在しており、図2を見ると陽葉の分布に対応して、太陽方向側及び日当たりの良い樹冠上端から大きな蛍光放射があることがわか

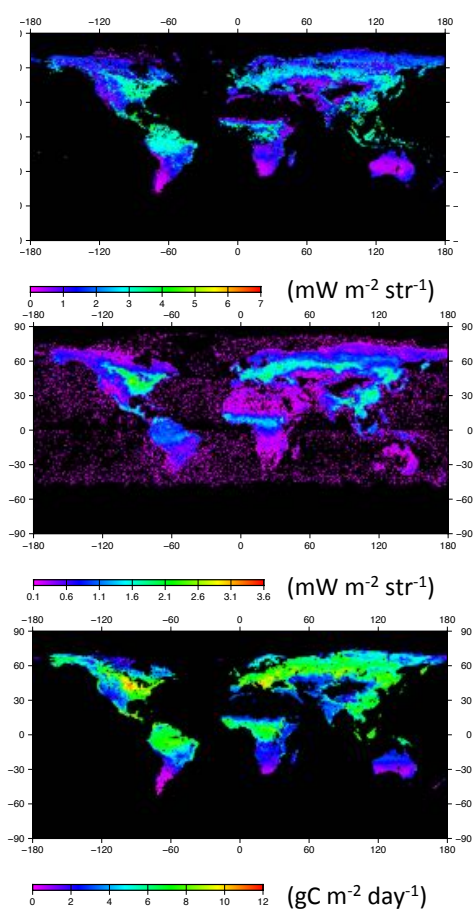


図5. 2009年7月の解析例。上段：蛍光放射伝達モデルによる全球蛍光放射輝度計算値、中段：GOME-2データによるクロロフィル蛍光のリトリバル値、下段：サポートベクター回帰によるGPPの推定値

る。一方、陰葉については陽葉とは逆に、太陽入射方向の反対側(Shaded direction)に多く存在しており、その影響でShaded directionから大きな蛍光放射が見られた。

このように、本研究で開発した蛍光放射伝達モデルとLiDAR観測値を用いることにより、三次元の詳細な蛍光マッピングが可能になった。

(3) 樹冠レベル蛍光の感度解析

衛星観測で得られる樹冠上端からの上向き蛍光放射輝度のシミュレーションを実施した(結果例：図3)。様々な条件でシミュレーションを実施した結果、以下の3つの知見が新たに得られた。

- ① 全波長域において日向のSIF寄与は日陰の3倍近いこと
- ② 波長700nm以下では、陽葉蛍光放射+陰葉蛍光放射はほぼ樹冠蛍光放射に等しい
- ③ 近赤外では、蛍光放射の葉群内での多重散乱が40%以上に達する場合がある

現在、クロロフィル蛍光のリトリバルに利用される衛星の観測波長帯は近赤外域であり、この波長領域で観測される樹冠蛍光には多重散乱成分が多く含まれるため、観測データの解釈には放射モデルなどによる、多重散乱と直接蛍光放射の分離が必要不可欠である事が明らかとなった。

(4) 蛍光放射のグローバル解析

蛍光放射シミュレーション、衛星推定値及びGPPの全球分布比較解析により、本研究で構築した蛍光放射モデルによる全球空間分布の特性が評価できた(結果例：図5)。

まず、蛍光シミュレーションとGOME-2の観測値を比較した結果、両者の空間分布は全球でよく一致した。例えば、図4から北米大陸の東側の蛍光強度の強い地域や西部の弱い地域の地理分布、ロシアの東西に広がる蛍光強度の強い帯状の地域、中国東北部から南部にかけての蛍光強度分布などがよく再現できている。図4の結果は2009年7月の例であるが、他の月においても同様の良い地理分布の対応関係が見られた。

その一方で、本研究で開発した蛍光放射モデルの蛍光輝度計算値は、GOME-2の観測値と比較して過大推定の傾向が見られた。この3年間の研究期間では、過大傾向の要因をすべて解決するには至らず、今後の課題として残った。

次に、GPPの推定値と蛍光シミュレーションの相関解析の結果、両者には一定の相関関係が見られ、2009年7月の全球比較で相関係数 $R^2=0.55$ を得た。この相関解析を2009年5月-9月まで実施したところ、月によってば

らつきはあるものの、相関係数 R^2 は 0.55-0.63 の値であった。

(5) まとめと今後の展望

本研究では、近年衛星観測による推定が可能になった、陸域植生のクロロフィル蛍光の利活用に向けた基礎研究として、蛍光放射伝達モデルの開発を進めた。また、森林などの三次元構造を詳細に検討できるようにするため、近年利用が進むレーザースキャナー (LiDAR) の点群データを利用できるようにモデルを拡張した。

クロロフィル蛍光の観測値は光合成活性指標として注目されている衛星観測物理量の一つである。一方で、樹冠レベルで観測される蛍光放射は、樹木の葉から射出され様々な光路を辿って衛星センサにたどりつく。本研究で、この両者を理論的に結ぶ付けることが可能な詳細な物理モデルが開発できた。今後、新たに開発したモデルを用いて衛星によるクロロフィル蛍光観測の物理的解釈が進められると期待される。

<引用文献>

- ① Kobayashi, H. and H. Iwabuchi (2008), A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape, *Remote Sensing of Environment*, 112, 173-185.
- ② Kondo M., Ichii K., Takagi H., Sasakawa M. (2015) Comparison of the data-driven top-down and bottom-up global terrestrial CO₂ exchanges: GOSAT CO₂ inversion and empirical eddy flux upscaling. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*. 120, 1226-1245, doi:10.1002/2014JG002866.
- ③ Joiner, J., Yoshida, Y., Vasilkov, A. P., Middleton, E. M., Campbell, P. K. E., Yoshida, Y., Kuze, A., and Corp, L. A., 2012: Filling-in of near-infrared solar lines by terrestrial fluorescence and other geophysical effects: simulations and space-based observations from SCIAMACHY and GOSAT, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 809-829, doi:10.5194/amt-5-809-2012.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Kobayashi, H., A. Yunus, S. Nagai, K. Sugiura, Y. Kim, B. V. Dam, H. Nagano, D. Zona, Y. Harazono, S. Bret-Harte,

K. Ichii, H. Ikawa, H. Iwata, W. C. Oechel, M. Ueyama, and R. Suzuki, (2016), Latitudinal gradient of spruce forest understory and tundra phenology in Alaska as observed from satellite and ground-based data, *Remote Sensing of Environment*, 177, 160-170. (査読有)

- ② Kobayashi, H. (2015), Directional effect of canopy scale sun-induced chlorophyll fluorescence: theoretical consideration in a 3-D radiative transfer model, *Proc. Of IGARSS 2015*, 3413-3415, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326552. (査読無)
- ③ Ikawa, H., T. Nakai, R. C Busey, Y. Kim, H. Kobayashi, S. Nagai, M. Ueyama, K. Saito, H. Nagano, R. Suzuki, L. Hinzman, (2015), Understory CO₂, sensible heat, and latent heat fluxes in a black spruce forest in interior Alaska, *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215, 80-90. (査読有)
- ④ Inoue, T., S. Nagai, H. Kobayashi, H. Koizumi (2015), Utilization of ground-based digital photography for the evaluation of seasonal changes in the aboveground green biomass and foliage phenology in a grassland ecosystem, *Ecological Informatics*, 25, 1-9. (査読有)
- ⑤ Inoue, T., S. Nagai, T.M. Saitoh, H. Muraoka, K.N. Nasahara, H. Koizumi (2014), Detection of the different characteristics of year-to-year variation in foliage phenology among deciduous broad leaved tree species by using daily continuous canopy surface images, *Ecological Informatics*, 22, 58-68. (査読有)
- ⑥ Kobayashi, H., S. Nagai, T. Inoue, K. Ichii (2014), Angular and canopy structure dependency of canopy scale chlorophyll fluorescence simulated by the newly developed three dimensional plant canopy fluorescence model, *Proc. 5th Int'l Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence*, available http://congrexprojects.com/Custom/14C04/14C04_index.htm (査読無)

[学会発表] (計 14 件)

- ① Kobayashi H., Yang W., Ichii K., Global simulation of canopy scale sun-induced chlorophyll fluorescence with a 3 dimensional radiative transfer model, AGU fall meeting 2015, 2015 年 12 月 18 日, サンフランシスコ・米国

- ② Kobayashi, H., Nagai, S., Inoue, T., Yang, W., Ichii, K., Modelling canopy scale solar induced chlorophyll fluorescence simulated by the three dimensional radiative transfer model, AGU fall meeting 2014, 2014 年 12 月 14 日, サンフランシスコ・米国
- ③ Kobayashi, H, Analysis of green up onset across east Siberian and Alaskan forests, AGU fall meeting 2013, 2013 年 12 月 13 日, サンフランシスコ・米国

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 秀樹 (KOBAYASHI, Hideki)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球
表層物質循環研究分野・主任研究員
研究者番号：10392961

(2) 研究分担者

井上 智晴 (INOUE, Tomoharu)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球
表層物質循環研究分野・ポストドクトラル
研究員
研究者番号：20608822

市井 和仁 (ICHII, Kazuhito)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球
表層物質循環研究分野・主任研究員
研究者番号：50345865

永井 信 (NAGAI, Shin)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球
表層物質循環研究分野・主任研究員
研究者番号：70452167

楊 偉 (YANG, Wei)
国立大学法人千葉大学・環境リモートセン
シング研究センター・特任助教
研究者番号：80725044